

# ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА УДАРНОГО ТОКА МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

Судаков А.И.<sup>1</sup>, Чабанов Е.А.<sup>1</sup>, Шулаков Н.В.<sup>1</sup>, Крылова И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия, [sudakov38@mail.ru](mailto:sudakov38@mail.ru), [ceapb@mail.ru](mailto:ceapb@mail.ru), [shulakov@pstu.ru](mailto:shulakov@pstu.ru), [irina2948666@rambler.ru](mailto:irina2948666@rambler.ru)

**Abstract**—The scientific team of Perm National Research Polytechnic University including Prof. N. Shulakov, Ass. Prof. A. Sudakov, Ass. Prof. E. Chabanov, S. Lec. S. Shutemov have won a grant number 13-08-96044 of Federal State Organization "Russian Foundation for Basic Research". They have been developing new approaches in the identification of transients powerful synchronous machines within the range of national standards of the Russian Federation on the results of bench tests.

**Keywords:** *synchronous machine, transition process, research, identification, time constant, the mean square error.*

## I. ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ

Определение ударного тока в опытах внезапного симметричного короткого замыкания (ВКЗ) мощных синхронных машин (МСМ) по отечественным стандартам [1,2] сопряжено с огромной трудоёмкостью и неточностью из-за проблем точной записи переходного процесса (ПП), подготовительных операций к обмеру вершин тока якоря, расчётам электромагнитных постоянных времени (ПВ) составляющих тока якоря, разделения составляющих и определения их начальных значений с использованием графоаналитических операций, точное определение временного сдвига первой вершины в фазах статора и так далее. Определение ударного тока при номинальном уровне напряжения испытания или близкого к нему связано с непредсказуемыми последствиями конструктивной прочности самой машины. Поэтому, например, в США, опыт ВКЗ исключён из программы приёмочных испытаний СМ.

В докладе представлен весьма эффективный способ экспресс-оценки ударного тока в опытах ВКЗ МСМ (на примере ТТК-50-2УЗ-П:  $P_n = 50$  МВт,  $U_n = 10,5$  кВ,  $I_n = 3,44$  кА) без предварительного определения параметров идентифицированных переходных процессов. Опыты проводят при нескольких пониженных безопасных для конструкции машин уровнях напряжения статора, строят зависимость ударного тока от заданных уровней напряжения статора и экстраполируют полученной зависимости на номинальное напряжение статора получают ожидаемый ударный ток. Это позволяет принять необходимое решение при серийном изготовлении МСМ о целесообразности проведения опыта ВКЗ при номинальном напряжении или отказа от него.

## II. ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Переходный процесс в опытах ВКЗ МСМ записывают цифровым запоминающим осциллографом (ЦЗО), например фирмы «LeCroy» (США), использование которых снимает многие проблемы при обработке ПП по результатам стендовых испытаний в опытах ВКЗ МСМ. Широкий динамический диапазон записываемых переходных процессов ЦЗО обеспечивает высокую точность дискретизации первичной информации в опытах ВКЗ, сдвига первой вершины тока ВКЗ, установившегося значение тока якоря и др. преимущества.

В программном продукте Excel по простым выражениям осуществляется выделение вершин, разделение полного тока якоря при ПП на симметричный и асимметричный токи якоря. В среде LabVIEW на базе разработанного ВСМ [3,4] симметричный ток якоря разделяют на составляющие с их идентификацией и всего процесса в целом, обеспечивая высокую точность и достоверность.

## III. ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Экспресс-оценку ударного тока предлагается осуществлять по опытным данным вместо использования результатов идентификации ПП СМ:

$$i_{уд.оп}(\Delta T) = |i_{oj}(\Delta T)| - |i_{uj}(\Delta T)| = I_{vj}(\Delta T), \quad \text{при } j = \overline{1,2} \quad (1)$$

где  $i_{oj}(\Delta T)$  – значение тока якоря на первом периоде между обеими дискретными огибающими ПП, представляющее сумму наибольшей вершины тока якоря и интерполяционного значения  $i_{uj}(\Delta T)$ , которая называется элементом при идентификации ПП ВСМ;

$\Delta T$  – время, на которое наибольшая вершина первого периода тока якоря отстоит от начала ПП;

$i_{uj}(\Delta T)$  – интерполяционное значение тока якоря напротив наибольшей вершины (рис.1);

$(I_{vj})_{оп}$  – наибольшая вершина тока якоря, отстоящая от начала ПП на величину  $\Delta T$ , которая представляет собой величину ударного тока.

Элемент тока якоря в зависимости от расположения наибольшей вершины тока якоря на первом периоде ПП рассчитывают по формулам [3,4]

$$i_{oj}(\Delta T) = |i_{uj}| + |I_{Bj}|, \quad (2)$$

при  $j = 1, i_{uj} = 1,875 \cdot I_{B(j+1)} - 1,25 \cdot I_{B(j+3)} + 0,375 \cdot I_{B(j+5)},$   
 при  $j = 2, i_{uj} = 0,375 \cdot I_{B(j-1)} + 0,75 \cdot I_{B(j+1)} - 0,125 \cdot I_{B(j+3)},$

где  $I_{B2}, I_{B4}, I_{B6}$  – чётные вершины тока якоря (рис.1а);  
 $I_{B1}, I_{B3}, I_{B5}$  – нечётные вершины тока якоря (рис.1б).

На рис. 2,3 представлены фрагменты осциллограмм ПП в опытах ВКЗ по результатам стендовых испытаний данной МСМ при разных уровнях напряжений статора.

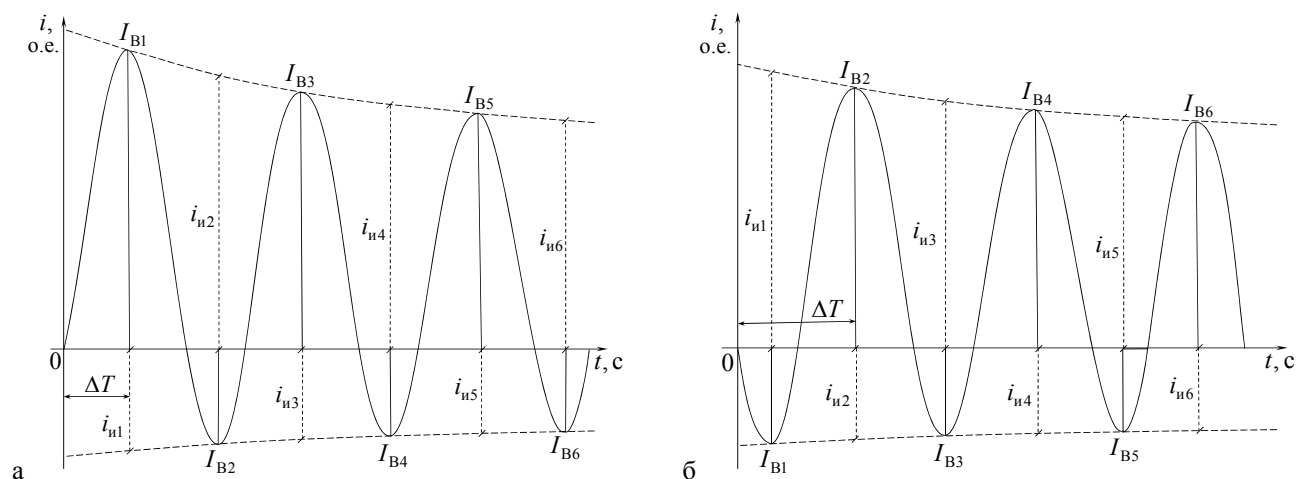


Рис. 1. Дискретно заданный переходный процесс в опыте ВКЗ на отрезке из трех первых периодов

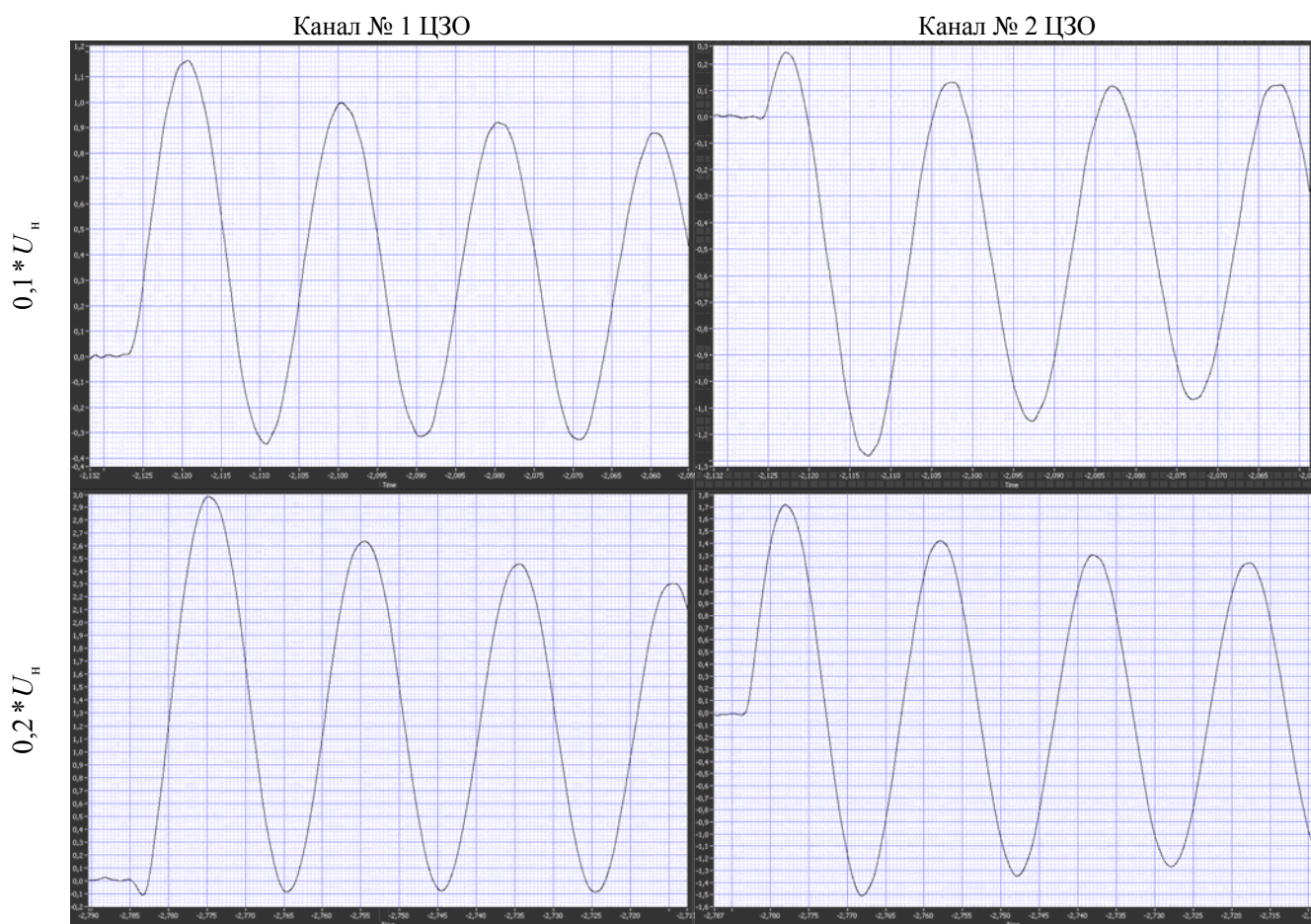


Рис. 2. Фрагменты осциллограмм в опытах ВКЗ ТТК-50-2УЗ-П на участках переходных процессов

из трех первых периодов (для испытательных напряжений  $0,1 \cdot U_H$ ,  $0,2 \cdot U_H$ )

Канал № 1 ЦЗО

Канал № 2 ЦЗО

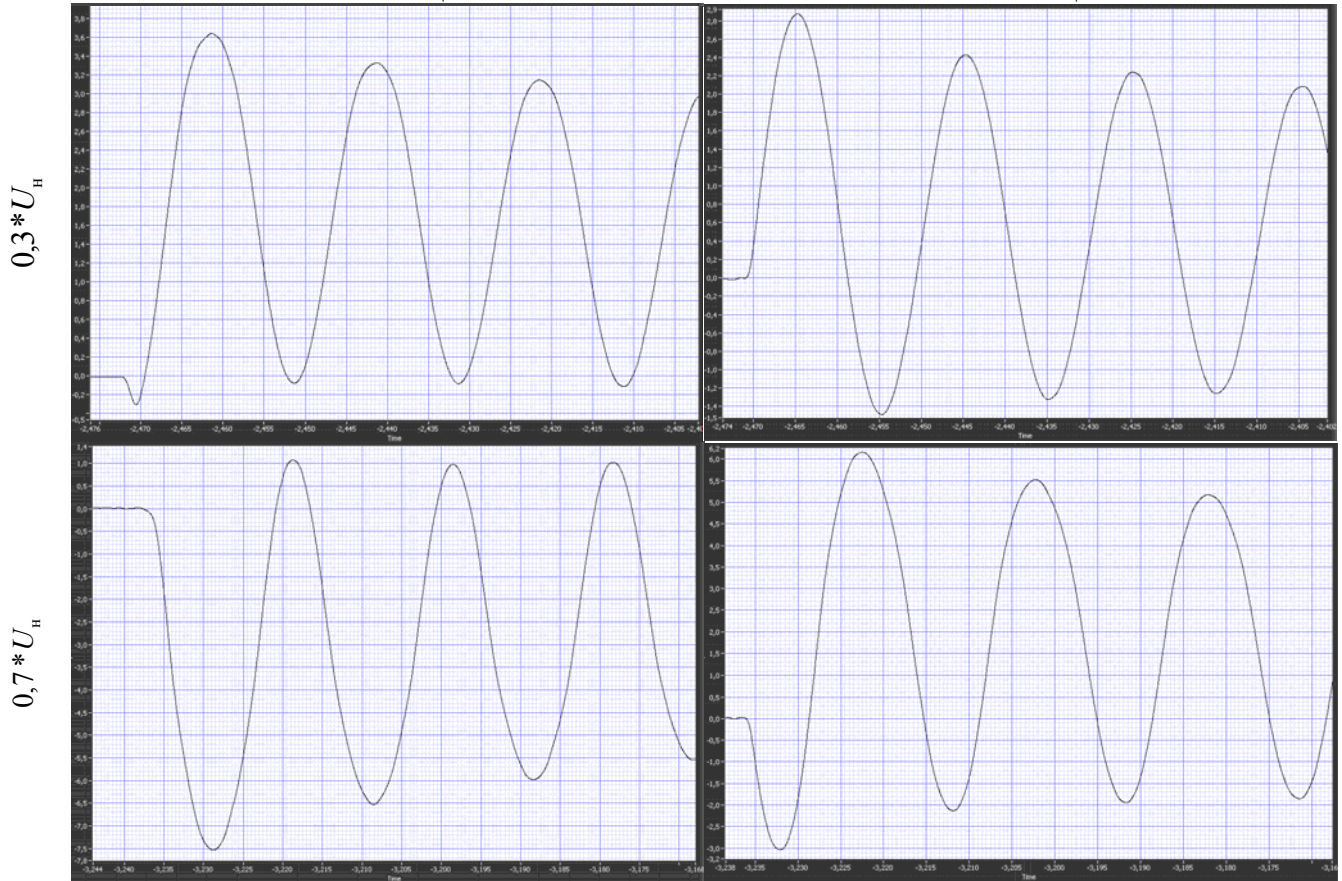


Рис. 3. Фрагменты осциллограмм в опытах ВКЗ ТТК-50-2УЗ-П на участках переходных процессов из трех первых периодов (для испытательных напряжений  $0,3 \cdot U_H$ ,  $0,7 \cdot U_H$ )

Следует отметить, что во всех узлах дискретизации ПП элементы  $i_{oj}$  дискретно заданного ПП содержат переходную составляющую  $i'_{oj}$ , сверхпереходную составляющую  $i''_{oj}$ , установившееся значение тока якоря  $I_\infty$ , которые представляют симметричный ток якоря, а также аperiodическую составляющую, которые затухают с разными ПВ и начальными значениями  $I'_0$ ,  $I''_0$ ,  $I_{0a}$ .

Для проверки правильности предложенного способа экспресс - оценки ударного тока в докладе представлены результаты идентификации ПП в опытах ВКЗ с использованием (ВСМ) [3,4,5].

По полученным параметрам идентификации ПП с помощью ВСМ ударный ток по (1) моделировался для времени  $\Delta T$

$$i_{уд.мод}(\Delta T) = |i_{oj.мод}(\Delta T)| - |i_{ij.расч}(\Delta T)| = I_{в.мод}(\Delta T) \quad (3)$$

где  $i_{oj.мод}(\Delta T) = 2I'_{0эф} \cdot e^{-\frac{\Delta T}{\Phi_{ф}}} + 2I''_{0эф} \cdot e^{-\frac{\Delta T}{\Phi_{ф}}} + 2I_\infty$  – полученная по параметрам идентификации ВСМ модель элемента в узле в зависимости от расположения наибольшей вершины дискретного ПП на первом периоде;

$i_{ij.расч}(\Delta T)$  – интерполяционное значение тока якоря рассчитанное по (2) в зависимости от расположения наибольшей вершины дискретного ПП на первом периоде.

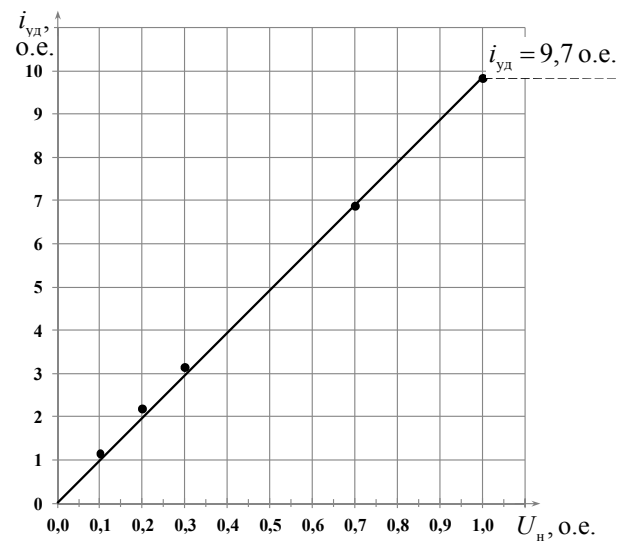


Рис. 4. К оценке ударного тока при  $U_H$  МСМ

Расчет ударного тока в соответствии со стандартами на методы испытания СМ более 100 кВА по формуле при рекомендуемом времени 0,01с от начала процесса не всегда соответствует нахождению первой вершины ПП в данном месте

$$i_{уд} = I'_{0эф} \cdot e^{-\frac{0,01}{\tau'_{эф}}} + I''_{0эф} \cdot e^{-\frac{0,01}{\tau''_{эф}}} + I_{\infty} + I_{0а} \cdot e^{-\frac{0,01}{\tau_a}} \quad (4)$$

Расчёт ударного тока будет математически некорректным из-за отсутствия в данном месте первой вершины и, следовательно, ошибочным.

На рис. 4 представлен способ оценки ударного тока данной МСМ экстраполяцией полученной зависимости  $i_{уд}$  от уровней напряжения испытания на  $U_H$ , который позволяет получать ожидаемое значение

ударного тока без проведения опыта ВКЗ при  $U_H$  для принятия решения при серийном изготовлении МСМ о целесообразности проведения такого опыта или отказа от него.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ полученных результатов в таблице подтверждает высокую сходимость полученных величин ударного тока предложенным способом без использования параметров идентификации ПП в опытах ВКЗ МСМ.

Отклонение  $i_{уд.станд}$  от опытного значения составляет от 0,57% до 5,16 % (от сотен до полутора тысяч ампер).

Таблица

Результаты расчетов по экспресс-оценке ударного тока

Испытательное напряжение		0,1* $U_H$		0,2* $U_H$		0,3* $U_H$		0,7* $U_H$	
Канал		1	2	1	2	1	2	1	2
$\tau'_{эф}$ , с		0,687045	0,659732	0,713405	0,715241	0,743775	0,690574	0,827122	0,782122
$2I'_{0эф}$ , о.е.		1,1671	1,1513	2,3373	2,3253	3,0193	3,1716	6,3121	6,6188
$\tau''_{эф}$ , с		0,017264	0,017706	0,024600	0,025011	0,017643	0,024140	0,022800	0,019739
$2I''_{0эф}$ , о.е.		0,4406	0,4273	0,7961	0,9484	0,8463	1,2881	2,6901	2,9092
$\tau_a$ , с		0,197175	0,302320	0,231568	0,025133	0,277079	0,178224	0,201903	0,368306
$I_{0а}$ , о.е.		0,4099	0,5673	1,5648	0,0727	1,7863	0,6673	3,3628	1,7581
$2I_{\infty}$ , о.е.		0,116	0,112	0,262	0,252	0,354	0,362	0,734	0,720
$\Delta T$ , с		0,0085	0,0035	0,0020	0,0050	0,00125	0,0065	0,0100	0,0045
$I_{B1}$ , о.е.		+1,1616	+0,2432	-0,1120	+1,7284	-0,3000	+2,8873	-7,5529	-3,0717
$I_{B2}$ , о.е.		-0,3438	-1,2812	+2,9781	-1,4942	+3,6503	-1,4795	+1,0537	+6,1204
$i_{уд.станд}$ , о.е.	0,01с	1,1461	1,2933	3,0092	1,6392	3,6295	2,8005	7,5529	6,2148
	$\Delta T$ с	1,1616	1,2707	3,0424	1,7284	3,6517	2,8873	7,5529	5,9966
$i_{уд.оп}$	о.е.	1,1616	1,2812	2,9781	1,7284	3,6503	2,8873	7,5529	6,1204
	% отклонения	0	0	0	0	0	0	0	0
$i_{уд.мод}$	о.е.	1,1616	1,2781	2,9930	1,7283	3,6452	2,8873	7,5530	6,0831
	% отклонения	0,00	0,24	0,50	0,26	0,14	0,00	0,00	0,60
$i_{и1.расч}$ , о.е.		0,3764	0,1745	0,0977	1,6093	0,1524	1,6006	1,1522	2,5296

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ 10169 – 77. Машины электрические трёхфазные синхронные. Методы испытаний.
- Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
- Судаков А.И. Вероятностно-статистические методы исследования переходных процессов мощных синхронных машин / А.И. Судаков, Е.А. Чабанов, Н.В. Шулаков // Электротехника, -2010. - №8 – С. 22-29.
- Судаков А.И. Модернизация вероятностно-статистических методов исследования переходных

процессов мощных синхронных машин / А.И. Судаков, Е.А. Чабанов, Н.В. Шулаков // Электротехника, -2010. - №6 – С. 20-26.

5. Судаков А.И. Новые подходы идентификации переходных процессов синхронных машин в опытах внезапного симметричного короткого замыкания вероятностно-статистическими методами / А.И. Судаков, Е.А. Чабанов, Н.В. Шулаков // Интеллектуальные системы в производстве, -2013. - №2 (22) – С. 207-213.